初始容重对土壤水分特征曲线的影响

张鹏飞[1]， 贾小旭[2,3]， 赵春雷[2,3]， 邵明安[1,2,3]

（1. 西北农林科技大学资源环境学院，陕西 杨凌 712100； 2. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室，北京 100101； 3. 中国科学院大学资源与环境学院，北京 100190）

摘 要：土壤水分特征曲线是土壤的重要水分运动参数之一，受土壤质地、容重、结构、温度等影响。为探明初始容重对土壤水分特征曲线及相应水分运动参数的影响，选取3种类型土壤，分别设置5个初始容重处理，利用van Genuchten模型拟合获取土壤水分特征曲线及其水分运动参数，分析初始容重对不同类型土壤水分特征曲线及相应水分运动参数的影响。结果表明：(1) 近饱和段(S<100 kPa)，相同土壤水吸力下3种土壤的水分特征曲线均表现为随着初始容重的增加土壤体积含水量逐渐增加；而在较高的土壤水吸力段(S>100 kPa)，黑土的水分特征曲面随着初始容重的增加平缓上升，红壤的水分特征曲面在初始容重由1.3 $cm^3·cm^{-3}$增加到1.4 $cm^3·cm^{-3}$的过程中呈下降趋势，塿土的水分特征曲面在初始容重由1.3 $cm^3·cm^{-3}$增加到1.4 $cm^3·cm^{-3}$时上升的更加陡直。(2) van Genuchten模型对土壤水分特征曲线拟合效果较好(R^2>0.99)，适用于这3种类型土壤不同初始容重条件下的水分特征曲线的拟合。(3) 3种土壤的水分运动参数α、θ_s与初始容重均表现为显著的负相关关系(P<0.01)，且黑土水分运动参数α在不同初始容重间差异显著(P<0.05)；红壤的水分运动参数θ_r与初始容重表现为显著的负相关关系(P<0.01)，减小幅度达10%；黑土初始容重与土壤水分运动参数n表现为显著的正相关关系(P<0.01)；而红壤和塿土初始容重与土壤水分运动参数n呈负相关关系，但关系不显著(P>0.01)，且3种土壤不同初始容重处理间水分运动参数n的变化幅度较小，变化幅度维持在0.1左右。研究结果可为不同类型土壤、不同初始容重条件下土壤水分运动参数的获取及水文过程模拟提供参考。

关键词：土壤水分特征曲线； 离心机； 初始容重； 水分运动参数

土壤水分特征曲线反映了土壤水吸力与土壤体积含水率之间的定量关系，是土壤水文研究的重要指标[1]。土壤水分特征曲线与土壤孔隙状况密切相关，一切影响土壤孔隙状况和水分特性的因素都会对其产生影响[2]，包括土壤容重[3]、质地[4]、结构[5]等。由于土壤水分特征曲线影响因素复杂，目前尚未从理论上建立土壤含水量与土壤基质势之间的关系，通常利用Brooks-Corey模型[6]、Campbell模型[7]、van Genuchten模型[8]等经验公式进行描述。其中，van Genuchten模型因其适用多种类型土壤、模拟精度高而被广泛使用。

容重是土壤的基本物理性质之一，是土壤水分运动参数、土壤水分特征曲线的重要影响因素[3,9-12]。容重对土壤水分特征曲线的影响受到研究者的关注，如邵明安等[13]研究了填装土土壤水分特征曲线测量过程中质量含水量、吸力和容重三者间的定量关系，研究发现土壤持水特性是由土壤质量含水量、吸力和容重3个变量共同确定的一个曲面。李卓等[14]利用模拟实验研究了容重对土壤水分蓄持能力影响，结果表明土壤的水分蓄持能力随容重的增加而减小。关于容重对土壤水分运动参数的影响，付晓莉等[15]研究了土壤水分特征曲线测定过程产生的容重变化对水分运动参数的影响，结果表明参数α随容重的增大而减小，可用幂函数表示；黑垆土和塿土的参数λ、n随容重的增加而增大，可用线性函数描述。吕殿青等[16]利用石蜡固定容积方法，研究了不同压实程度土壤的水分特征曲线，结果表明水分运动参数λ、α随容重的增大而减小，可分别用幂函数和线性关系表示。虽然，容重对土壤水分特征曲线、土壤水分运动参数的影响已有大量研

收稿日期：2021-12-15； **修订日期：**2022-05-05

基金项目：国家自然科学基金面上项目(41877016)；中国科学院战略性先导科技专项(XDB40020305)

作者简介：张鹏飞(1997-)，男，硕士研究生，主要从事土壤物理与水文生态方面研究. E-mail: pengfei.zhang@nwafu.edu.cn

通讯作者：邵明安. E-mail: mashao@ms.iswc.ac.cn

究，但以往研究更加关注测定过程中容重变化对土壤水分特征曲线、土壤水分运动参数的影响，且土壤类型单一，缺乏不同初始容重和不同土壤类型处理下的对比实验研究。基于此，为探究初始容重对不同质地土壤水分特征曲线、水分运动参数的影响，本研究选取黑土、红壤和塿土3种土壤类型，每种土壤设定5个初始填装容重（1.0 g·cm^{-3}、1.1 g·cm^{-3}、1.2 g·cm^{-3}、1.3 g·cm^{-3}、1.4 g·cm^{-3}），通过离心机测量不同初始容重处理的土壤水分特征曲线，对比不同处理间土壤水分特征曲线的差异，并利用van Genuchten模型对实测数据进行拟合，得到土壤水分运动参数，分析初始容重对不同处理土壤水分运动参数的影响。本研究可为明确初始容重对土壤水分特征曲线及其水分运动参数的影响提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选取杨凌塿土、江西红壤、黑龙江黑土为实验供试土壤。3种土壤经自然风干后过2 mm筛，利用吸管法对颗粒组成进行测定分析，土壤质地分析采用国际制划分标准，3种供试土壤的颗粒组成及质地类型见表1。

表1 3种供试土壤的颗粒组成和质地

Tab. 1 Particle composition and texture of three soils tested

土壤类型	砂粒含量/%	粉粒含量/%	黏粒含量/%	土壤质地
黑土	22.72	44.33	32.95	黏质壤土
红壤	6.73	53.19	40.08	粉砂质黏土
塿土	15.10	59.90	25.00	粉砂质黏(壤)土

1.2 研究方法

于2020年12月在中国科学院水利部水土保持研究所进行，首先将自然风干后的土样磨碎过2 mm筛，然后分别按照设定初始容重填装在体积为100 cm^{3}的环刀中，为减小不同初始容重处理填装过程中的误差，土壤样品采用逐层填装的方法，每层土壤样品填装完成后对其表层进行人工打磨，以保证每层土壤之间自然衔接。填装完成后将环刀饱和24 h，测定其饱和含水量。利用高速冷冻离心机（CR21G）测定土壤水分特征曲线，测定时保持温度稳定在20 ℃，测定不同吸力下（1 kPa、10 kPa、20 kPa、40 kPa、60 kPa、80 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa、600 kPa、800 kPa）土壤样品相应的体积含水量，对应的离心机转速分别为310 r·min^{-1}、981 r·min^{-1}、1387 r·min^{-1}、1961 r·min^{-1}、2402 r·min^{-1}、2774 r·min^{-1}、3101 r·min^{-1}、4385 r·min^{-1}、6202 r·min^{-1}、7596 r·min^{-1}、8771 r·min^{-1}，其测定时间分别为10 min、26 min、36 min、45 min、51 min、55 min、58 min、68 min、77 min、83 min、87 min。实验设置3个重复处理，土壤含水量取3个重复的平均值进行分析。

1.3 土壤水分特征曲线模型

利用RETC软件中的van Genuchten模型对离心机实测数据进行拟合，得到土壤水分运动参数[17]。van Genuchten模型[8,18]的具体数学表达式为：

$$\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}=\frac{1}{\left[1+(\alpha h)^n\right]^m} \quad (1)$$

式中：θ为土壤含水量（cm^3·cm^{-3}）；θ_r为残余含水量（cm^3·cm^{-3}）；θ_s为饱和含水量（cm^3·cm^{-3}）；h为压力水头（cm）；α、n、m为形状参数，其中$m=1-1/n$。

1.4 数据处理方法

采用Excel对数据进行统计分析，SPSS 25.0对不同处理土壤水分运动参数（θ_r、θ_s、α、n）进行单因素方差分析，明确3种土壤不同初始容重处理之间水分运动参数的差异性，然后利用Pearson相关分析对3种土壤类型下初始容重与土壤水分运动参数的相关性进行分析，进一步明确土壤水力参数与初始容重的线性关系，采用Origin2021b软件进行图像化处理。选取均方根误差（RMSE）和决定系数（R^2）作为土壤含水率实测值与van Genuchten模型预测值之间差异性的评价指标。RMSE[19]表达式为：

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(X_i-Y_i)^2}{N}} \quad (2)$$

式中：X_i为体积含水率实测值；Y_i为模型拟合值；N为用于模型拟合的样本个数。

2 结果与分析

2.1 van Genuchten模型对3种土壤水分特征曲线拟合效果评价

通过RETC软件对离心机实测数据进行拟合，得到van Genuchten模型拟合参数R^2，将实测值和拟合值代入公式(2)求得模型拟合效果评价指标均方根误差RMSE，具体结果见表2。其中，拟合参数R^2越接近于1，均方根误差RMSE越接近于0，van Ge-

表2 黑土、红壤和塿土不同初始容重处理拟合参数 R^2 和评价指标RMSE

Tab. 2 Fitting parameters R^2 and evaluation index RMSE of black soil, red soil and loess soil with different initial bulk density treatments

土壤类型	初始容重/(g·cm^{-3})	RMSE	R^2
黑土	1.0	0.0018	0.9997
	1.1	0.0025	0.9992
	1.2	0.0015	0.9995
	1.3	0.0013	0.9993
	1.4	0.0015	0.9985
红壤	1.0	0.0033	0.9987
	1.1	0.0024	0.9990
	1.2	0.0028	0.9977
	1.3	0.0024	0.9974
	1.4	0.0013	0.9993
塿土	1.0	0.0018	0.9997
	1.1	0.0027	0.9992
	1.2	0.0023	0.9991
	1.3	0.0018	0.9992
	1.4	0.0021	0.9978

nuchten模型拟合效果越好[19]。

由表2可知，3种土壤不同初始容重处理van Genuchten模型拟合参数 R^2 均高于0.99，且求得的模型拟合效果评价指标均方根误差RMSE均低于0.01，结果表明拟合值与实测值之间的误差较小，van Genuchten模型拟合效果较好，可用于黑土、红壤和塿土不同初始容重处理土壤含水量实测值的拟合。

2.2 初始容重对3种不同质地土壤水分特征曲线的影响

对比3种土壤的水分特征曲面（图1）发现，在近饱和段（S<100 kPa），3种土壤的水分特征曲面表现为相似的变化趋势，即相同土壤水吸力下随着初始容重的增加土壤体积含水率逐渐增加。而在高吸力段（S>100 kPa），3种土壤的水分特征曲面表现为不同的变化趋势。对于黑土而言，随着初始容重的增加土壤水分特征曲面平缓上升（图1a），红壤的水分特征曲面在初始容重由1.3 g·cm^{-3}增加到1.4 g·cm^{-3}的过程中呈下降趋势（图1b），而塿土的水分特征曲面在初始容重由1.3 g·cm^{-3}增加到1.4 g·cm^{-3}时上升的更加陡直（图1c）。

2.3 初始容重对3种不同质地土壤水分运动参数的影响

由图1可知，3种土壤的水分特征曲面随着初始容重变化的趋势有所不同，表明土壤质地、初始容重对土壤水分特征曲线存在一定的影响，进而导致不同处理土壤水分运动参数存在差异[20]。4个水分运动参数中，3种土壤的水分运动参数 α、θ_s 与初始容重均表现为显著的负相关关系（P<0.01）（图2），即随着初始容重的增加，水分运动参数 α（图3a）、θ_s（图3b）逐渐降低，其中黑土水分运动参数 α 在不同初始容重间差异显著（P<0.05），相较于其他2个水分运动参数，α、θ_s 受初始容重的影响较大。除初始容重1.4 g·cm^{-3}处理外，相同初始容重下塿土的水分运动参数 θ_r 显著低于黑土和红壤（图3c），其中，黑土和塿土的水分运动参数 θ_r 与初始容重无显著关系，而红壤的水分运动参数 θ_r 与初始容重表现为显著的负相关关系（P<0.01），且随着初始容重的增加，θ_r 的减小幅度较大，高达10%。这表明相较于黑土和塿土，红壤的水分运动参数 θ_r 受初始容重的影响较大。黑土初始容重与土壤水分运动参数 n 表现为显著的正相关关系（P<0.01），而红壤和塿土初始容重与土壤

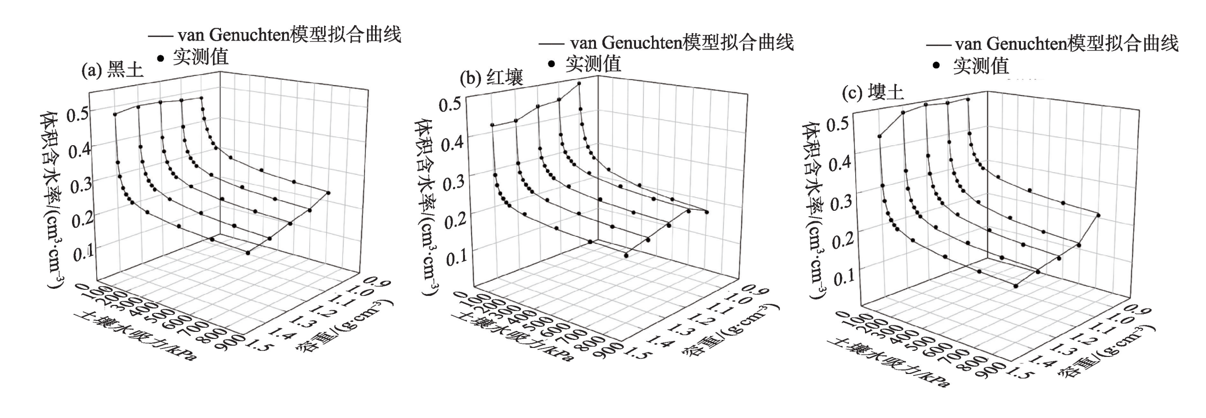
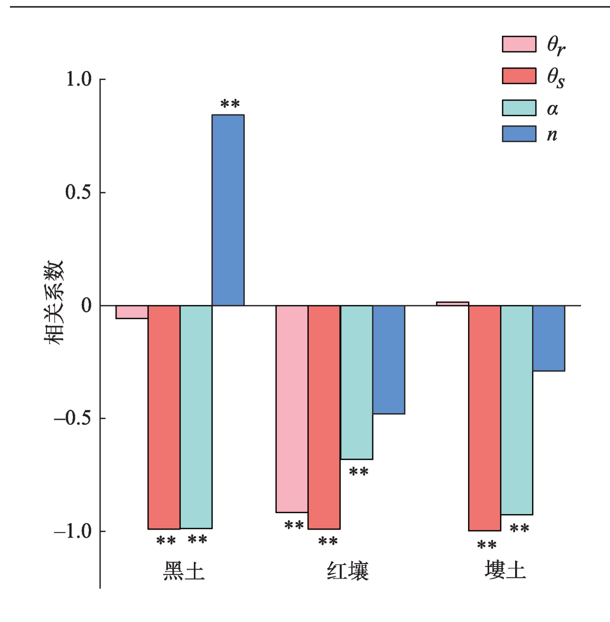


图1 黑土（a）、红壤（b）和塿土（c）的水分特征曲面

Fig. 1 Moisture characteristic surfaces of black soil (a), red soil (b) and loess soil (c)



注:**表示显著性水平为$P<0.01$。

图2 黑土、红壤和塿土初始容重与土壤水分运动参数相关系数分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of correlation coefficient between initial bulk density of black soil, red soil and loess soil and soil water movement parameters

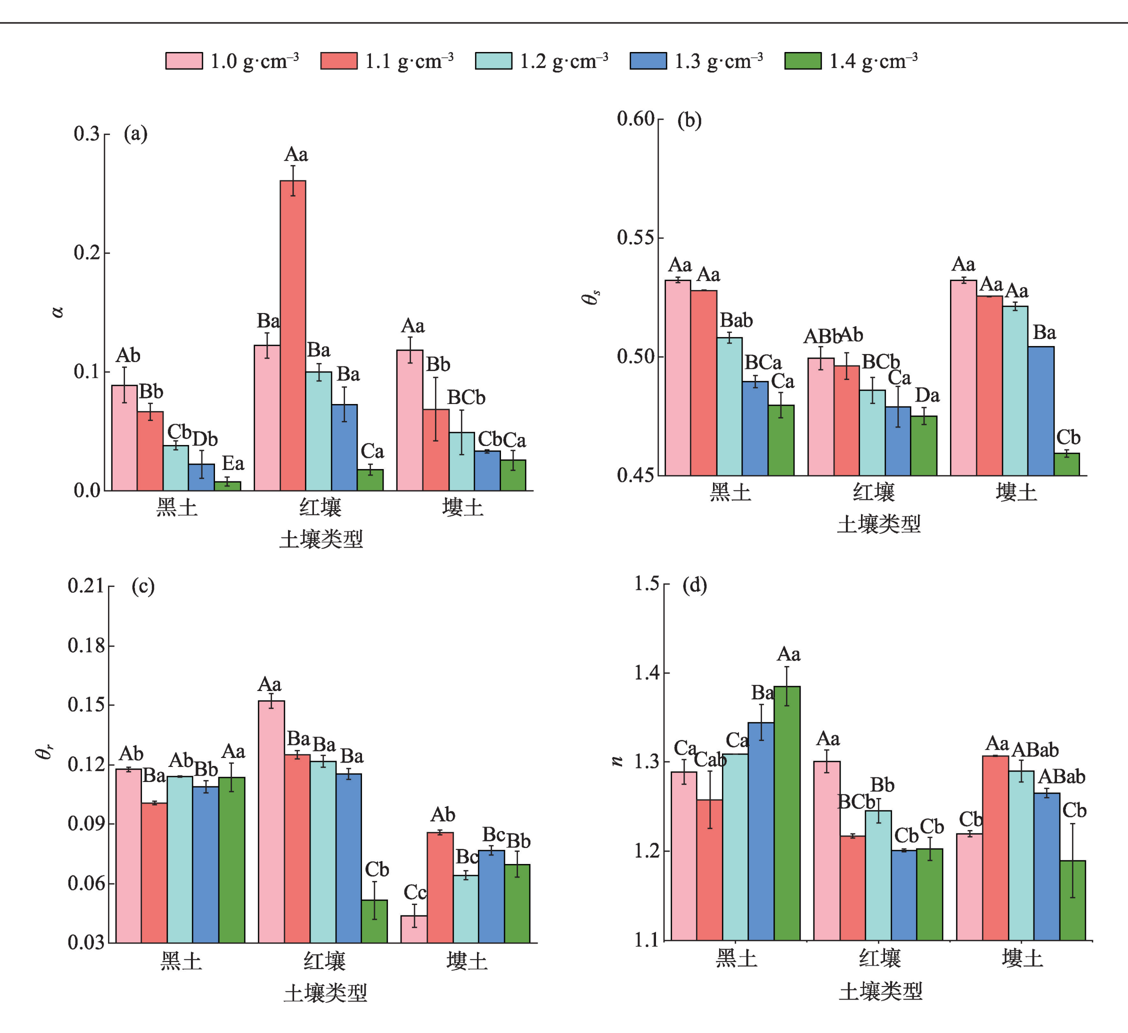
水分运动参数n呈负相关关系,但关系不显著($P>0.01$),这表明相较于红壤和塿土,黑土的水分运动参数n受初始容重的影响较大,但3种土壤不同初始容重处理水分运动参数n的变化幅度较小,都维持在0.1左右(图3d)。

3 讨 论

土壤水分特征曲线的影响因素众多,其中包括土壤质地、总孔隙度和容重等[21],本研究探讨了初始容重、质地对土壤水分特征曲线及其水分运动参数的影响。本研究发现,土壤质地和初始容重对土壤水分特征曲线的影响主要集中在较高的土壤水吸力段。其中,红壤的水分特征曲面在初始容重由1.3 g·cm^{-3}增加到1.4 g·cm^{-3}的过程中呈下降趋势,这是因为红壤中黏粒含量较高,且砂粒含量较低,相同初始容重下相比黑土、塿土有更多的小孔隙,在高容重处理中,较高的离心力使这些小孔隙中的水被排出,导致土壤含水率呈下降趋势。相比之下,塿土的水分特征曲面在初始容重由1.3 g·cm^{-3}增加到1.4 g·cm^{-3}的过程中上升的更加陡直。这是因为塿土中黏粒含量较其他2种土壤低,土壤大孔隙数量较多,而张丽娜[22]基于CT扫描技术的矿区不同容重土壤水力特性的预测研究发现,土壤压实容易改变土壤孔隙形态,其大孔隙数量随着容重的增加而减小,压实过程中对大孔隙的破坏程度较高,若压实程度过大,将导致土壤大孔隙消失。本研究中,离心力使得土壤发生收缩,产生压实效应。因此,塿土中大孔隙数量逐渐减小,增加了小孔隙数量,进而增加了塿土的持水能力[23]。

初始容重对土壤饱和含水量参数θ_s和水分运动参数α影响较大,且3种土壤均表现为显著的负相关关系。这是由于饱和含水量θ_s与土壤孔隙度密切相关[24],而初始容重对土壤孔隙度存在影响,汪言在等[25]通过对北方农牧交错带表层土壤孔隙度特征及其影响因素研究发现,土壤孔隙度与田间持水量存在正相关关系,而容重与土壤孔隙度存在负相关关系。因此,本研究中,土壤饱和含水量参数θ_s随着初始容重的增加逐渐减小。而水分运动参数α与土壤进气值的倒数密切相关[15],导致随着初始容重的增加,土壤进气值逐渐增加,水分运动参数α逐渐减小。而土壤水分运动参数θ_r、n与初始容重的关系在3种土壤间有所不同。相较于黑土和塿土而言,红壤的水分运动参数θ_r与初始容重表现为显著的负相关关系,且红壤水分运动参数θ_r在初始容重为1.0 g·cm^{-3}、1.4 g·cm^{-3}时,分别达到最大值和最小值,与其他初始容重处理具有显著差异($P<0.05$),减小幅度达10%,受初始容重影响较大。这是因为红壤中黏粒含量较黑土和塿土高,随着初始容重的增加,土壤小孔隙数量逐渐增加,一般认为,水分运动参数θ_r对应的土壤水吸力为1500 kPa[15],该吸力下,土壤小孔隙中的水逐渐被排出,导致水分运动参数θ_r随初始容重增加逐渐降低,且变化幅度较大。

此外,实验过程中发现,离心机测量过程中较高的离心力使得土壤会发生一定程度的收缩,导致初始容重发生变化,这与孙中峰等[26]对晋西黄土区坡面林地土壤持水性能研究结果一致。在本研究中,这一现象导致塿土的水分特征曲面在初始容重由1.3 g·cm^{-3}增加到1.4 g·cm^{-3}时上升的更加陡直,这与吕殿青等[16]采用石蜡固定容积的方法测量土壤水分特征曲线的结果存在差异。因此,今后的研究需要定量分析离心机测量过程中土壤收缩对水分特征曲线及其水分运动参数的影响。例如,结合测量过程中土壤收缩较小的压力膜仪测量方法[27],对比离心机、压力膜仪测量所得土壤水分特征曲线及其水分运动参数的差异性,进一步明确离心机测



注:不同大写字母表示同一质地土壤不同初始容重间差异显著(P<0.05);不同小写字母表示相同初始容重下不同土壤质地间差异显著(P<0.05)。

图3 黑土、红壤和塿土不同初始容重处理的水分运动参数α(a)、θ_s(b)、θ_r(c)和n(d)特征

Fig. 3 Characteristics of water movement parameters α(a)、θ_s(b)、θ_r (c) and n (d) in black soil, red soil and loess soil under different bulk densities

量过程中土壤收缩对水分特征曲线及其水分运动参数的影响。

4 结 论

通过研究土壤初始容重、质地对水分特征曲线及其水分运动参数的影响,得到主要结论如下:

(1) van Genuchten模型对不同处理水分特征曲线拟合效果较好,可用于黑土、红壤和塿土不同初始容重处理水分特征曲线的拟合。

(2) 土壤质地和初始容重对水分特征曲线的影响主要集中在较高的水吸力段。在近饱和段,相同水吸力下3种土壤的水分特征曲线均表现为随着初始容重的增加,体积含水量逐渐增加;而在高吸力段,较大离心力使得3种土壤水分特征曲线随初始容重变化趋势存在差异,在初始容重由1.3 g·cm^{-3}增加到1.4 g·cm^{-3}的过程中,红壤由于其黏粒含量较高,水分特征曲面呈下降趋势,而砂粒含量较高的塿土的水分特征曲面变的更加陡直。

(3) 3种土壤的水分运动参数α、θ_s与初始容重均表现为显著的负相关关系,受初始容重的影响较大;而水分运动参数θ_r、n与初始容重的相关性受土壤质地的影响,导致3种不同土壤质地间水分运动参数θ_r、n与初始容重的关系存在差异。

参考文献(References):

[1] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988. [Lei Zhidong, Yang Shixiu, Xie Senchuan. Soil Water Dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988.]

[2] 林琳, 单博, 卢倩倩, 等. 模拟机械压实黑土持水特征与孔隙分布[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(12): 102-105. [Lin Lin, Shan Bo, Lu Qianqian, et al. Water retention characteristics and

pore size distribution of black soil under simulated mechanical compaction[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42 (12): 102–105.]

[3] 洪成, 尹殿胜, 陈俊英, 等. 容重对黏壤土土壤水分特征曲线的影响[J]. 节水灌溉, 2018(10): 5–8. [Hong Cheng, Yin Diansheng, Chen Junying, et al. Impact of bulk density on soil water characteristic curve of clay loam[J]. Water Saving Irrigation, 2018(10): 5–8.]

[4] 舒凯民, 樊贵盛. 基于质地的土壤水分特征曲线参数非线性预测[J]. 人民黄河, 2016, 38(7): 138–141, 145. [Shu Kaimin, Fan Guisheng. The nonlinear prediction of soil water characteristic curve parameterbased on the soil texture[J]. Yellow River, 2016, 38(7): 138–141, 145.]

[5] 李小刚. 影响土壤水分特征曲线的因素[J]. 甘肃农业大学学报, 1994(3): 273–278. [Li Xiaogang. Factors affecting soil moisture characteristic curve[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 1994(3): 273–278.]

[6] Brooks R H, Corey A T. Hydraulic properties of porous media and their relation to drainage design[J]. Transactions of the ASAE, 1964, 7(1): 26–28.

[7] 王改改, 张玉龙, 虞娜. 砂质土壤持水特性空间变异特征传递函数模型[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2012, 31(3): 366–369. [Wang Gaigai, Zhang Yulong, Yu Na. Spatial variability of water retention capability in aeolian sandy soil and its pedotransfer function[J]. Journal of Liaoning Technology University (Natural Science Edition), 2012, 31(3): 366–369.]

[8] van Genuchten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892–898.

[9] 王紫薇, 黄来明, 邵明安, 等. 青海高寒区不同土地利用方式下土壤持水能力及影响因素[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1722–1730. [Wang Ziwei, Huang Laiming, Shao Ming'an, et al. Soil water holding capacity under different land use patterns in the Qinghai alpine region[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1722–1730.]

[10] 秦文静, 樊贵盛. 冲洪积平原土壤低吸力阶段水分特征曲线影响因素研究[J]. 节水灌溉, 2019(10): 38–42. [Qin Wenjing, Fan Guisheng. Study on influencing factors of water characteristic curve of alluvial-diluvial plain soil at low suction stage[J]. Water-Saving Irrigation, 2019(10): 38–42.]

[11] 李祥东, 邵明安, 赵春雷. 西北干旱区土壤水力参数空间变异与模拟[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1325–1332. [Li Xiangdong, Shao Ming'an, Zhao Chunlei. Spatial variability and simulation of soil hydraulic parameters in arid Northwest China[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1325–1332.]

[12] Kalhoro S A, Xu X, Ding K, et al. The effects of different land uses on soil hydraulic properties in the Loess Plateau, northern China [J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(11): 3907–3916.

[13] 邵明安, 吕殿青, 付晓莉, 等. 土壤持水特征测定中质量含水量、吸力和容重三者间定量关系I. 填装土壤[J]. 土壤学报, 2007, 44 (6): 1003–1009. [Shao Ming'an, Lyu Dianqing, Fu Xiaoli, et al. Quantitative relationship between mass water content, pressure head and bulk density in determination of soil water retention characteristics I. Packed soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44 (6): 1003–1009.]

[14] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 611–620. [Li Zhuo, Wu Pute, Feng Hao, et al. Simulated experiment on effects of bulk density on soil water holding capacity[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47 (4): 611–620.]

[15] 付晓莉, 邵明安. SWCC测定过程产生的容重变化对SWCC参数的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 178–182. [Fu Xiaoli, Shao Ming'an. Effect of changing bulk density during SWCC measurement on SWCC parameters[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(3): 178–182.]

[16] 吕殿青, 邵明安, 潘云. 容重变化与土壤水分特征的依赖关系研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 209–212, 216. [Lyu Dianqing, Shao Ming'an, Pan Yun. Dependent relationship between bulk density changes and soil water characteristics[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(3): 209–212, 216.]

[17] Nezhad M S, Nasab S B. Application of RETC model in determining the hydraulic functions of the unsaturated soil[J]. Researcher, 2017, 9(5): 54–57.

[18] Li S, Li D F. Comparison of different approaches for estimating soil water characteristic curves from saturation to oven dryness[J]. Journal of Hydrology, 2019, 577(C): 123971.

[19] 王子龙, 常广义, 姜秋香, 等. 黑土区土壤水分特征曲线模拟及模型优选[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(9): 36–43, 60. [Wang Zilong, Chang Guangyi, Jiang Qiuxiang, et al. Simulation and models optimization of soil water characteristic curve inblack soil region[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(9): 36–43, 60.]

[20] Lu D Q, Shao M A, Horton R, et al. Effect of changing bulk density during water desorption measurement on soil hydraulic properties[J]. Soil Science, 2004, 169(5): 319–329.

[21] 刘小宁, 隆瑞红, 罗珠珠, 等. 甘肃省典型土壤持水特性及影响因素研究[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(1): 143–151. [Liu Xiaoning, Long Ruihong, Luo Zhuzhu, et al. Research on water-holding capacity and related factorsin typical soils of Gansu Province [J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2017, 35(1): 143–151.]

[22] 张丽娜. 基于CT扫描技术的矿区不同容重土壤水力特性的预测研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2020. [Zhang Li'na. Prediction of Hydraulic Characteristics of Soils with Different Bulk Density Based on CT Technique[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.]

[23] 聂坤堃, 聂卫波, 马孝义. 离心机法测定土壤水分特征曲线中的收缩特性[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(11): 978–985. [Nie Kunkun, Nie Weibo, Ma Xiaoyi. Soil shrinkage property during soil water characteristic curvesbeing measured by centrifugal method[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(11): 978–985.]

[24] 高露, 张圣微, 赵鸿彬, 等. 退化草原土壤理化性质空间异质性及其对土壤水分的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 607–617. [Gao Lu, Zhang Shengwei, Zhao Hongbin, et al. Spatial heterogene-

ity of soil physical and chemical properties in degraded grassland and their effect on soil moisture[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 607−617.]

[25] 汪言在, 苏正安, 周明华. 北方农牧交错带表层土壤孔隙度特征及其影响因素[J]. 草业科学, 2020, 37(7): 1249−1258. [Wang Yanzai, Su Zheng'an, Zhou Minghua. Characteristics and influence of topsoil porosity in the northern agro-pastoral ecotone[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(7): 1249−1258.]

[26] 孙中峰, 张学培, 刘卉芳, 等. 晋西黄土区坡面林地土壤持水性能研究[J]. 干旱区研究, 2004, 21(4): 343−347. [Sun Zhongfeng, Zhang Xuepei, Liu Huifang, et al. Study on the water-conserving capabilities of soils under the sloped woodlands in the loess area in west Shanxi Province[J]. Arid Zone Research, 2004, 21(4): 343−347.]

[27] 刘思春, 高亚军, 王永一, 等. 土壤水势测定方法的选择及准确性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4): 189−192. [Liu Sichun, Gao Yajun, Wang Yongyi, et al. Preliminary study on selection and accuracy of different methods for measurement of soil water potential[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2011, 29(4): 189−192.]

Effects of initial bulk density on soil water characteristic curve

ZHANG Pengfei[1], JIA Xiaoxu[2,3], ZHAO Chunlei[2,3], SHAO Ming'an[1,2,3]

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Soil water characteristic curve is one of the important soil water movement parameters affected by soil texture, bulk density, structure, and temperature. Three types of soil were selected in this study and five initial bulk density treatments were set to explore the effect of initial bulk density on soil water characteristic curve and its corresponding water movement parameters. The soil water characteristic curve and its water movement parameters were obtained by van Genuchten model fitting, and the effect of initial bulk density on soil water characteristic curve and corresponding water movement parameters of different types was analyzed. The results showed that in the near-saturation stage (S < 100 kPa), the water characteristic curves of the three soils under the same soil water suction all showed a gradual increase in soil volumetric water content with the initial bulk density. In the high soil water suction section (S > 100 kPa), the water characteristic surface of black soil gradually increased with the initial bulk density, and the water characteristic surface of red soil decreased with the increase in initial bulk density from 1.3 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ to 1.4 $cm^3 \cdot cm^{-3}$. The difference lies in a remarkably steep increase in the water characteristic surface of loess soil from 1.3 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ to 1.4 $cm^3 \cdot cm^{-3}$. The van Genuchten model had a good fitting effect on the soil water characteristic curve ($R^2 > 0.99$), which was suitable for fitting the water characteristic curve of the three types of soil under different bulk densities. The water movement parameters α and θ_s of the three soils were significantly negatively correlated with the initial bulk density ($P < 0.01$), and the water movement parameters α were significantly different from the initial bulk density of the black soil ($P < 0.05$). The water movement parameter θ_r of red soil was also significantly negatively correlated with the initial bulk density ($P < 0.01$), demonstrating a 10% reduction. A significant positive correlation was also found between the initial bulk density of black soil and soil water movement parameter n ($P < 0.01$). The initial bulk density of red and loess soil was negatively correlated with soil water movement parameter n, but the relationship was insignificant ($P > 0.01$). The variation range of water movement parameter n of the three soils under different initial bulk density treatments is small, and the variation range remains at approximately 0.1. The results can provide a reference for the acquisition of soil water movement parameters and hydrological process simulation under different types of soil and initial bulk densities.

Keywords: soil water characteristic curve; centrifuge; initial bulk density; water movement parameters